

博士論文要旨

色弁別閾値に基づく色覚補正法に関する研究
Color vision compensation using discrimination thresholds matching.情報セキュリティ科学専攻 望月理香
Rika Mochizuki

1 はじめに

人間が知覚する色は、周囲の環境や個人差により多様であり、その特性を外から観測することは不可能である。そのため、色知覚を客観的にモデル化することは困難であり、色弱視のように個人差に合わせた補正が必要な場合、厳密な補正基準を定めることは困難である。さらに、物理的に同一の色であっても周囲の色の影響によって知覚特性は異なるが、複数の色が存在する場合の色知覚は十分検討されていない。

本研究では、実際に測定した色弁別閾値によって、人間の色覚特性を表現する。まず、単色知覚の場合、各色の閾値を一致させるといふ補正基準に基づくことで、任意の被験者間で等しい色知覚を与えることを実現する。その発展として、複数色の知覚特性を考慮するため、画像の中の任意の領域における色空間の幾何学をファイバー束を用いて定義する。そして、それらの色空間の間で色差を保存する写像を求めることで任意の色空間同士の写像を定め、色覚補正や色再現の実現方式について考察する。

2 色弁別閾値による補正基準

色弁別閾値とは MacAdam の楕円に示されるように、異なる色の色差を見分けることのできる最小の差である。完全な色盲者は、混同色線方向上の色を区別できないため色弁別閾値が無限であると考えられる。一方、色弱者の場合は一般色覚者に比べてこの閾値が混同色線方向に伸びているが、その閾値が無限大ではないため有限でしかも測定可能である。一般的に、色弁別閾値は個人ごとに固有の色知覚特性である。

2.1 色弁別閾値と主観色差

色空間は、各色における弁別閾値により定義されるリーマン空間であることが知られている。例えば、点 x の近くに偏移 dx が引き起こす色差を局所距離

$$\|dx\|^2 = dx^T R(x) dx \quad (1)$$

によって表す。色ベクトル x 近辺の色弁別閾値楕円(球)は、 x から単位距離の色差を与え、 x におけるリーマン計量 $R(x)$ を定義する。今、異なるリーマン計量(色弁別閾値)が $R(x), R(y)$ で表される二つの色空間を S_1, S_2 を考え、写像

$$f: S_1 \longrightarrow S_2$$

に対して S_1 のある点 x の近傍で写像 $y = f(x)$ が定義され、 x と y における局所距離が等しいとき二つの空間は x で局所等長である。 S_1, S_2 が任意の x におい

て局所等長であれば、両空間は局所等長であると定義される。また、リーマン空間での任意二点 x_1, x_2 間の距離は、二点を結ぶ測地線(二点間の最短曲線) γ_{12} の長さで測ることができ、測地線 γ_{12} 上の経路積分で表される。

$$d(x_1, x_2) = \int_{\gamma_{12}} \|dx\| = \int_{\gamma_{12}} \sqrt{dx^T R(x) dx} \quad (2)$$

リーマン空間 S_1 と S_2 の間に写像 f が定義され、

$$x_1, x_2 \in S_1, \quad y_1 = f(x_1), y_2 = f(x_2) \in S_2 \quad (3)$$

としたとき任意の x_1, x_2 間の距離と y_1, y_2 間の距離が等しければ、二つの空間は大域等長であると定義される。リーマン幾何の理論より、局所等長な二つのリーマン空間は必ず大域的にも等長であり、その逆も成り立つ。つまり、変換前後の点の近傍での局所色差が常に等しければ、変換前後の任意の二点間の大域色差も常に等しいことが保証される。

従って、二つの空間 S_1, S_2 を一般色覚者及び色弱者の色知覚空間と考え、色弁別閾値が全ての点において等しくなるように局所補正を行えば、一般色覚者と色弱者の大域色差を一致させることも可能である。

これらの事実を踏まえ、「全ての色における色弁別閾値が一般色覚者のものと同様である」という色弱の補正基準を提案する。

2.2 色弱写像と補正方式

まず、色弱者の色空間 C_w から一般色覚者の色空間 C_n への色弱写像 w を以下のように定義する。

$$w: C_w \longrightarrow C_n: \quad y = w(x)$$

D_w を w のヤコビアンとすると、

$$dy = D_w dx \quad (4)$$

色弱者と一般色覚者の色弁別閾値を一致させるためには、

$$R_n(y) = D_w^T R_w(x) D_w \quad (5)$$

を満たさなければならない。

w を推定するためには、各色において色弱写像 w のヤコビアン D_w を推定する必要がある。

さらに、補正写像を色弱写像 w の逆写像 w^{-1} と定義し、 $z = w^{-1}(x)$ を色弱者に提示することで、一般色覚者と同様な色弁別閾値を実現することができる。

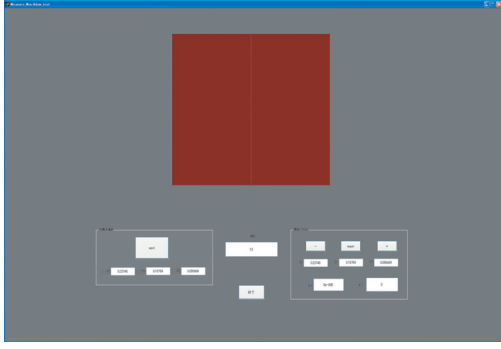


図 1: GUI による実験画面

3 色弁別閾値の測定

提案基準による補正を施すため、まず心理物理学実験を構成して色弁別閾値を測定する必要がある。人間の色弁別閾値は、心理物理量として実測が可能である。被験者は 80cm の距離から、ディスプレイ上に表示された 14cm × 14cm の色の正方形を観察する。ボタンをクリックして測定する色の三刺激値を微小量ずつ変化させ、正方形の右側の色の変化を感じた時点で次の色の測定に移るといった過程を繰り返す。

4 閾値方程式の推定

閾値楕球 (楕円) を推定するにあたり、測定データからの近似方程式の導出及び推定に用いた最小二乗法の計算法を示す。まず、楕球の方程式

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + dxy + exz + fyz = 1 \quad (6)$$

を推定するために、楕球面上の n 個の標本点の座標を $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1 \cdots n$ とする。求める係数ベクトル α , データ行列などを定義すると以下となる。

$$\alpha := (a, b, \dots, f)^T \quad \beta := (1, 1, \dots, 1)^T \quad (7)$$

$$A = \begin{pmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & x_1 y_1 & x_1 z_1 & y_1 z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & x_2 y_2 & x_2 z_2 & y_2 z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 & x_n y_n & x_n z_n & y_n z_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$A\alpha = \beta \quad (9)$$

ここで最小二乗法を用いると係数ベクトルは次のように求めることができる。

$$\alpha = (A^T A)^{-1} A^T \beta \quad (10)$$

以上のように推定された楕球の方程式 (6) を 2 次形式で表現すると、

$$\mathbf{x} := (x, y, z)^T \quad G := \begin{pmatrix} a & d/2 & e/2 \\ d/2 & b & f/2 \\ e/2 & f/2 & c \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{x}^T G \mathbf{x} = 1 \quad (12)$$

となる。 G の固有値分解より、

$$G = V \Lambda V^T \quad \Lambda := \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{v} := V^T \mathbf{x} \quad (14)$$

$$\mathbf{v}^T \Lambda \mathbf{v} = 1 \quad (15)$$

$$\lambda_1 v_1^2 + \lambda_2 v_2^2 + \lambda_3 v_3^2 = \frac{v_1^2}{1/\lambda_1} + \frac{v_2^2}{1/\lambda_2} + \frac{v_3^2}{1/\lambda_3} = 1 \quad (16)$$

回転行列 V から回転角度及び仰角を求めることができる。また、推定した楕球の $X + Y + Z = 1$ となる平面、つまり xy 色度平面上の断面をとるとそれぞれ図 3 のようになる。全ての色において色弱者の楕円は健常者と比較して広がり確認できる。

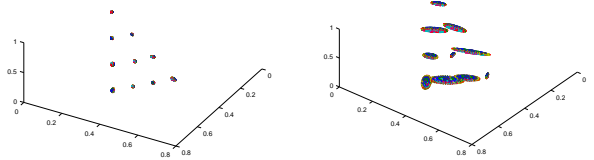


図 2: 閾値楕球 (均等標本点)

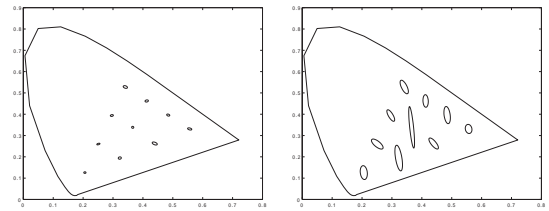


図 3: 楕球の xy 色度平面上の断面 (均等標本点)

5 色弱補正方式

補正方式として、まず Brettel らの色盲モデルに基づく混同色線方向の 1D の補正を示し、次に楕球の等長変換による高次元の補正を示す。

5.1 混同色線方向

測定データにおいて混同線方向に色を変化させた場合の閾値の比較を図 4 に示す。まず、1D での補正に

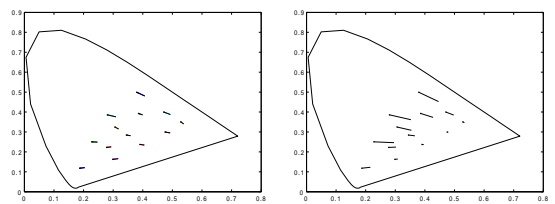


図 4: 混同線方向の閾値

おいては提案する補正基準に従い、個人の色弱の程度として色弱度を定義する。ここでは、Brettel らの色盲モデルを基にして、色盲者の色知覚の連続変形により色弱モデルの構築及び補正を行う。各色における色弱度は、健常者と色弱者の色弁別閾値の比率とする。

図 4 に示す健常者の色度弁別閾値を α_n 、色弱者の色度弁別閾値を α_w とする。色弱者の色弁別閾値は健常者のものと比較して長くなっている。

$$Q'' = w(Q) = \omega Q' + (1-\omega)Q \quad 0 \leq \omega \leq 1 \quad (17)$$

色刺激 Q と色盲者の色知覚 Q' の間の比率を表す ω を色弱の程度を表すパラメータとして「色弱度」と定義し、色弱者の色知覚 Q'' を式 (17) と表す。

$$= Q' + (1 - \omega)(Q - Q') \quad (18)$$

その逆写像として今度は長さ $(Q - Q')$ をあらかじめ $1/(1 - \omega)$ 倍してから色弱者に見せることで、健常者と同様な色彩情報を与えることが可能と考えられる。補正後の色刺激 P を式で表すと以下ようになる。

$$P = w^{-1}(Q) = Q' + \frac{1}{1 - \omega}(Q - Q') \quad (19)$$

この P を色弱写像 (17) に代入すると $w(P) = Q$ 、つまり色弱者は P を Q として知覚できることが確認される。

$$1 - \omega := \frac{\alpha_n}{\alpha_\omega} \quad (20)$$

として色弱度を表し、補正はその逆数倍、つまり色弱者の閾値を $1/(1 - \omega)$ 倍拡大することで、色弁別閾値が矯正される。色により色弱度は様々であるため、 xy 色度平面上での領域分割を行うことで各色に合わせた補正率を用い、全ての色に対応した補正が施せる。

5.2 均等標本点

楕円及び楕球は様々な方向への広がっており、人間の色弁別は単純に一方方向の記述のみでは不十分である。特に色弱補正においては、色知覚特性の個人差への対応はとても重要であるため、色知覚の複雑な特性を考慮した厳密な補正を施すためには、より高次元での写像を適用する必要がある。

そこで、色弱写像及び補正写像の高次元への拡張方式について述べる。一次元の色弱写像は一つのパラメータ ω により色弱度として表現されたが、高次元においては行列 W によって局所的に記述することができる。色弱行列 W は、測定した閾値楕球 (楕円) を一致させることにより推定することができる。 i 番目の測定色におけるヤコビアンを W_i とすると、

$$y = W_i x. \quad (21)$$

行列 W_i は閾値楕円/楕球上の点対応により与えられる (例えば、長軸や短軸)。図 5 に、自然画像への適用結果を示す。

6 SD 法による評価

提案手法の効果を確認するために、simulation 画像を被験者に提示して SD 法による主観評価を行った。その結果、左図において、一般色覚者が元画像を見た印象 (i) と色弱者が元画像を見た印象 (ii) には差があるといえる。そして右図における補正後の評価では、一般色覚者が元画像を見た印象 (i) と色弱者が補正画像を見た印象 (ii)-2 が近づいたことがわかる。従って、自然画像の補正後は、補正前と比較すると一般色覚者と色弱者にほぼ同様な印象を与えられたことが確認できる。

7 ファイバー束と色空間

複数色知覚において、色の相互作用のために、異なる画素または領域における色の見えが異なってくる。その特性を色空間のリーマン幾何学特性によって記述するためには、画素毎に或いは領域毎に独自の色空間を付随した構造、つまり色空間のファイバー束を考察する必要がある。図 7 で、ファイバー空間である色空間 f は、写像 π によって base 空間 b の点 x (及びその近傍 U_x) と関連付けられる。

$$F_x := \pi^{-1}(x) \subset b \quad (22)$$

$$\pi^{-1}(U_x) \cong U_x \times F_x. \quad (23)$$

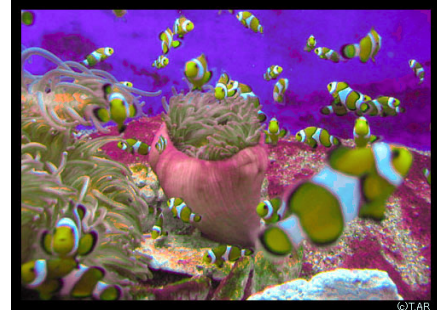


図 5: simulation, 元画像, 補正画像

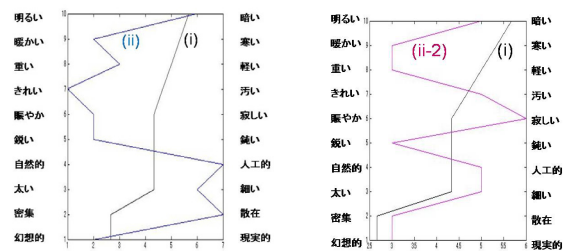


図 6: 左: 元画像の評価, 右: 3D 補正画像の評価

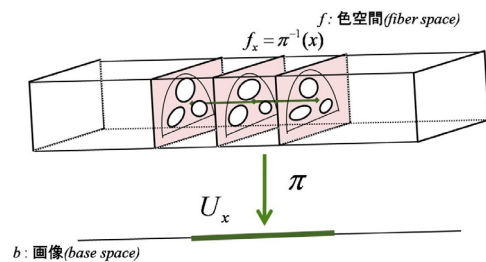


図 7: 複数色知覚におけるファイバー束

8 複数色の閾値測定と色覚補正

実際に、同一の色に対して複数色の影響がある場合と無い場合の色知覚を測定し、比較を行った。具体的には、視野分裂法においては両視野に同様な錯視図形を用いて、複数の色が存在する背景と三刺激値が等しいグレーの背景の下で測定対象とする色を変化させて色弁別閾値を測定している。測定方法は、対象となる色から三次元色空間内で均等な14方向に色を変化させ、色の変化を識別できた時点の値として記録する。各サンプル点の座標から、最小二乗法を用いて以下の楕球方程式の係数を得ることで閾値楕球が推定される。

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + dxy + exz + fyz = 1 \quad (24)$$

図8に示される楕球の推定結果より、単色と複数色の色弁別特性は大きく異なることが確認できる。従って、同一の色であっても周辺色の影響やその画面内での特性を考慮した、異なるリーマン色空間がそれぞれ定義される。

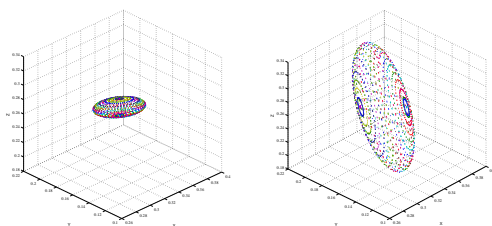


図8: 左: 複数色背景, 右: グレー背景

色覚補正また色再現のため、色差を保存する等長写像を以下のように構築する。ファイバー色空間 C_1, C_2 における計量 G_1, G_2 は色弁別閾値により与えられる。色差保存写像 $\iota: C_1 \rightarrow C_2$ は以下の条件によって定義する。

$$G_1(x) = A^T(x)G_2(\iota(x))A(x), \quad A = d\iota, \quad \forall x \in C_1$$

参照色 c_p に対して C_1 の色 α の C_2 における再現 α_2 は、式 (25), C_1 における C_2 の色再現は逆変換式 (26) によって与えられる。

$$\alpha_2 = A_p(\alpha_1 - c_p) + c_p \quad (25)$$

$$\beta_1 = A_p^{-1}(\beta_2 - c_p) + c_p \quad (26)$$

以上より、色知覚の simulation 及び他の色空間における色再現が可能となる。

9 錯視画像の補正

色の判別閾値測定法を利用し、閾値を一致させるという補正基準に基づく色覚補正の応用例として、以下に示すような錯視画像の色の補正を行った。

図9における左右の画像において、縦に三つ並ぶ正方形の真ん中の色は物理的に等しい色である。しかし、周囲の色の影響により異なる色として知覚されるという強烈な錯視画像である。そこで、物理的に等しいとされる真ん中の正方形の色について色弁別閾値の測定を行い、左右の四角形の閾値が等しくなるように補正した結果を図10に示す。元画像と比較すると左右の色の見えが等しくなっていることが確認できる。

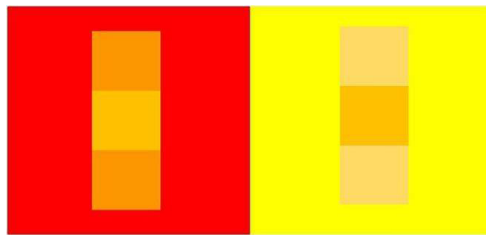


図9: 錯視画像

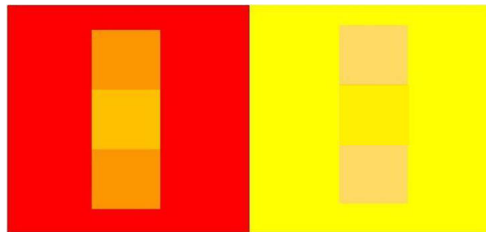


図10: 錯視画像(補正後)

10 結論と課題

本研究では、今まで観測不可能であった人間の色知覚を客観的に表現するため、色弁別閾値によりその基準を提案した！全ての色について色弱者と一般色覚者の色弁別閾値を等しくするという色弱補正の基準を提案し、個人の色知覚に合わせた補正を行った。まず、色盲モデルに基づき混同色線方向へ1Dの補正を施し、次に混同色線方向に限らず全ての方向に対し楕球の等長変換による補正を施した。最後に提案手法を自然画像へ適用し、SD法による補正効果の確認を行った。

続いて、色覚補正の応用として、画像内における複数の色同士の影響まで考慮した色空間をファイバー束に基づき定義し、物理的に等しい色であっても周辺色の影響によって色知覚が異なることを確認した。最後に、背景の影響を大きく受ける一例である色の錯視画像に対して、提案する補正基準に基づき判別閾値を一致させることで等しい色の見えを実現した。

今後の課題として、閾値データ測定の見易化及び補正の高速化と、画像の厳密な評価法の検討が挙げられる。色覚補正においては、色の同化、彩度対比など各種の錯視画像による色覚補正の検討と、絵画のような複雑な画像内の色覚測定による画像強調への応用が挙げられる。

参考文献

- [1] R.Mochizuki, T.Nakamura, J.Chao, R.Lenz, "Color-weak correction by discrimination threshold matching", Proceedings of CGIV2008, 4th European Conference on Color in Graphics, Imaging, and Vision, pp.208-213, Spain, 2008.
- [2] J.Chao, M.Suzuki, "On Non-Uniformness Of Color Spaces In Polychromatic Perception" Proceedings of ICIP99, 1999 International Conference on Image Processing, Vol.4, pp.314-318, 1999.
- [3] R.Mochizuki, S.Oshima, R.Lenz, J.Caho, "Exact compensation of color-weakness with discrimination threshold matching", 14th International Conference on Human-Computer Interaction(HCI 2011).
- [4] 望月理香, 趙 晋輝, 阿山みよし, "複数色知覚の判別閾値測定に基づく色覚補正法に関する考察", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2008.